



DOI: 10.22034/ijche.2024.418495.1354

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

Simulation of the Operation Conditions for Saponin Green Extraction from *Chubak* Using Subcritical Water and Evaluation of Their Characteristics

Sh. Nasiri¹, H. Jafarizadeh-Malmiri^{2*}, O. Ahmadi³

1- Ph. D. Student of Chemical Engineering, Sahand University of Technology

2- Associate Professor of Chemical Engineering, Sahand University of Technology

3- Assistant Professor of Chemical Engineering, University of Kurdistan

Email: h_jafarizadeh@sut.ac.ir

Abstract

Using subcritical water (temperature and pressure of higher than 100 °C and 1 atm) polarity of water changes into the organic solvents which that can be easily used in extraction of the valuable components from the plant sources. In the present study, simulation of the operation conditions for saponin extraction from the *Chubak* and using subcritical water was accomplished. Results indicated that by placing the of autoclave in the oven adjusted at temperatures of 120, 140, 160, 180 and 200 °C, after 120 min the international temperatures of the water inside the autoclave were 107, 124, 144, 161 and 178 °C, respectively. Saponin extraction was done using water at 130 °C and 120 min and the result indicated that the water inside of autoclave had temperature of 116 °C, which that was in subcritical state. The result revealed that lipid content of *Chubak* was 3% (W/W). Furthermore, extraction results indicated that the foaming height and emulsification capacity of the extracted sample using subcritical water were 2.7 and 1.5 folds higher than those of the extracted sample using water.

Received: 28 September 2023

Accepted: 29 January 2024

Page Number: 118-130

Keywords:

Chubak,
Green Extraction,
Saponin,
Simulation,
Subcritical Water

Please Cite this Article Using:

Nasiri, Sh., Jafarizadeh-Malmiri, H., & Ahmadi, O. (2025). Simulation of the Operation Conditions for Saponin Green Extraction from *Chubak* Using Subcritical Water and Evaluation of Their Characteristics. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(133), 118-130, [In Persian].



شبهه‌سازی شرایط عملیاتی استخراج سبز ساپونین از چوبک تحت شرایط آب مادون بحرانی و بررسی خواص آن

شاهین نصیری^۱، هدا جعفری‌زاده مالگیری^{۲*}، امید احمدی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

۳- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه کردستان

پیام‌نگار: h_jafarizadeh@sut.ac.ir

چکیده

استفاده از آب در شرایط مادون بحرانی (دما و فشار بالای ۱۰۰ درجه سلسیوس و ۱ اتمسفر) باعث تغییر قطبیت آن به سمت حلال‌های آلی می‌شود که به راحتی می‌توان از آن در استخراج ترکیبات با ارزش از منابع گیاهی استفاده کرد. در پژوهش حاضر، شبهه‌سازی شرایط عملیاتی استخراج ساپونین از چوبک به روش آب مادون بحرانی با استفاده از نرم‌افزار شبهه‌ساز انجام پذیرفت. نتایج شبهه‌سازی نشان داد که با اعمال دمای خارجی ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس بعد از زمان ۱۲۰ دقیقه، دمای آب مادون بحرانی داخل اتوکلاو به ترتیب ۱۰۷، ۱۲۴، ۱۴۴، ۱۶۱ و ۱۷۸ درجه سلسیوس است. استخراج ساپونین با دو روش خیساندن در آب و آب و آب مادون بحرانی انجام شد؛ نتایج نشان داد که میزان چربی موجود در چوبک ۳٪ وزنی است. نتایج داده‌های شبهه‌سازی نشان داد که در شرایط دمایی ۱۳۰ درجه سلسیوس و زمان ۱۲۰ دقیقه، دمای آب درون اتوکلاو ۱۱۶ درجه سلسیوس است. همچنین، نتایج استخراج نشان داد که میزان کف‌کنندگی و قدرت امولسیون‌کنندگی در نمونه استخراجی با آب مادون بحرانی به ترتیب ۲/۷ و ۱/۵ برابر نمونه استخراجی با آب است.

کلیدواژه‌ها:

آب مادون بحرانی،
استخراج سبز،
چوبک،
ساپونین،
شبهه‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۹
شماره صفحات: ۱۱۸ تا ۱۳۰

* تبریز، شهر جدید سهند، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی
استناد به مقاله:

نصیری، شاهین، جعفری‌زاده مالگیری، هدا، و احمدی، امید. (۱۴۰۳). شبهه‌سازی شرایط عملیاتی استخراج سبز ساپونین از چوبک تحت شرایط آب مادون بحرانی و بررسی خواص آن، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۳(۱۳۶)، ۱۱۸-۱۳۰.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر به‌دنبال تغییراتی که در سبک زندگی مردم به‌وجود آمده‌است، تمایل به مصرف محصولات ارگانیک و طبیعی افزایش یافته‌است. این مسأله باعث شده تا مطالعات زیادی برای بازیابی ترکیبات زیست‌فعال از گیاهان، ریزاندام‌ها و حیوانات انجام شود [۱]. از مواد گیاهی به‌صورت عمده برای استخراج ترکیبات زیست‌فعال موجود در آن‌ها استفاده می‌شود. این ترکیبات منبع مهمی برای بهبود کیفیت محصولات غذایی، پزشکی و آرایشی و بهداشتی است و شامل ترکیبات فنولی، فلانوئیدها، تیمول‌ها، پروتئین‌ها و ساپونین‌ها است. این ترکیبات زیست‌فعال دارای ویژگی‌های برجسته‌ای از جمله خاصیت آنتی‌اکسیدانی، محافظت‌از سیستم عصبی، خاصیت ضد میکروبی و تأثیر در کاهش فشارخون است [۲].

ساپونین‌ها متابولیت‌های ثانویه از منابع گیاهی است و از دو بخش آبدوست و آب‌گریز تشکیل شده و فرمول عمومی این مواد $C_{27}H_{48}O_{10}$ است [۳]. قسمت آبدوست ساپونین که تحت عنوان گلیکون تعریف می‌شود، از حلقه‌های کربوهیدرات مانند گالاکتوز، پنتوز، گلوکوز و سایر مواد مشابه تشکیل شده‌است. قسمت آب‌گریز ساپونین نیز که تحت عنوان آگلیکون تعریف می‌شود، به‌وسیله استروئیدها و یا تری‌ترین توسعه یافته‌است [۴]. از ساپونین به‌دلیل داشتن خواص دارویی از جمله خاصیت ضدالتهابی، ضد آزالیمیر، ضد سرطان و ضد پارکینسون، به‌عنوان ماده اولیه برای ساخت داروی مؤثر برای این بیماری‌ها استفاده می‌شود [۵]. اصلی‌ترین کاربرد ساپونین به‌عنوان سورفکتانت است. توجه صنعت و دانشگاه به این ماده تا حدی زیاد است که امروزه در زمینه‌هایی مانند افزایش استخراج نفت، اصلاح خاک، اولترافیلتراسیون، مواد افزودنی، فرمول‌بندی شامپو، کپسول‌سازی و سنتز نانوذرات نیز به‌کار می‌رود [۳، ۶].

درواقع، بیش از ۵۰۰ گونه گیاهی به‌عنوان منبع ساپونین گزارش شده‌است [۷]. گیاهانی از جمله کوالاجا، جو دوسر، بلوط هندی، سویا، شیرین‌بیان، کینوا، سدر، توت‌فرنگی و چوبک از جمله گیاهانی هستند که منبع ساپونین به‌حساب می‌آیند [۸، ۱]. چوبک گونه گیاهی از خانواده کارپوفیلانسیا است که دارای مقادیر زیادی از ساپونین است. ۶۱ زیرشاخه از این گیاه در جهان شناسایی شده‌است

که ۲۳ نوع آن در ایران می‌رویند [۹]. بیشتر ساپونین‌های استخراج‌یافته از چوبک، از جنس تری‌ترین است [۱].

روش‌های متداول و قدیمی استخراج ساپونین، شامل خیساندن در حلال، تقطیر، جوشاندن، دم‌کردن، حرارت‌دادن و یا سوکسله است. در این روش‌ها حلال باعث نرم‌شدن بافت گیاهی می‌شود تا مواد مطلوب خارج شود. از اشکالات اساسی این روش‌ها، گزینش‌پذیری پایین و مصرف بالای حلال شیمیایی مانند هگزان، کلروفرم، استون، بوتانول و متانول است [۱۰]. این حلال‌ها دارای طبیعت سمی، قابلیت فراریت بالا و اشتعال‌پذیری است. هم‌چنین برای سلامتی انسان و محیط‌زیست خطرناک است، بنابراین استفاده از روش‌ها و حلال‌های سبز بسیار مطلوب است [۱۱]. با پیشرفت‌های اخیر علمی، روش‌های سبز استخراج، به‌دلیل کم‌هزینه بودن، سازگاری با محیط زیست و قابلیت عملیاتی‌شدن در مقیاس‌های بالا، می‌توانند جای‌گزین مناسبی برای روش‌های شیمیایی باشد [۱۲]. شیمی سبز می‌تواند با ارائه روش‌های سبز در استخراج، گام بلندی در تولید مواد سالم‌تر و ایمن‌تر برای سلامتی انسان و محیط زیست بردارد [۱۳]. روش استخراج با آب مادون بحرانی به‌عنوان روشی سبز، معیارهای مورد توجه را در بازیابی مواد زیست‌فعال برآورده می‌سازد و به همین دلیل محل توجه قرار گرفته‌است [۱۴]. این روش که به‌عنوان آب داغ تحت فشار، آب فوق داغ و آب داغ متراکم نیز شناخته می‌شود، یکی از روش‌های سبز برای استخراج محسوب می‌شود. تحت این شرایط، آب باید در فشاری بالاتر از فشار بخار آب قرار گیرد تا بتواند در دمای بالای نقطه جوش هم‌چنان در حالت مایع باقی بماند [۱۵]. آب مادون بحرانی به‌عنوان آبی تعریف می‌شود که با کمک ایجاد فشار، در دمایی بالاتر از دمای جوش مرسوم آن یعنی ۱۰۰ درجه سلسیوس و دمایی پایین‌تر از دمای بحرانی خود یعنی ۳۷۴ درجه سلسیوس، به‌صورت مایع باقی بماند [۱۶]. در شرایط مادون بحرانی از میزان قطبی بودن آب کاسته و باعث می‌شود که بتواند ترکیبات غیر قطبی و نیمه‌قطبی مانند ساپونین را در خود حل کند و از طرفی، چون آب یک ماده دوست‌دار محیط‌زیست است برخلاف سایر مواد شیمیایی مورد استفاده برای استخراج، منجر به تولید محصول با کیفیت و سالم خواهد شد [۱۴].

ارائه یک مدل ریاضی مناسب، برای نمایش شرایط دمایی آب مادون بحرانی داخل محفظه استخراج (اتوکلاو) براساس دما و زمان

خاصیت قدرت امولسیون‌کنندگی نیز با استفاده از روغن آفتاب‌گردان خریداری‌شده از بازار تبریز اندازه‌گیری شد.

۲-۲ روش‌ها

۲-۲-۱ چربی‌زدایی

در بخش اول پژوهش، عملیات چربی‌زدایی از پودر چوبک به‌منظور افزایش بازده استخراج انجام گرفت. این فرایند با حلال پترولیوم اتر در دمای ۴۵ درجهٔ سلسیوس در یک دستگاه سوکسله و به‌مدت ۴ ساعت انجام گرفت. پس از اتمام عملیات، پودر چربی‌زدایی‌شده، در دستگاه آون در دمای ۶۰ درجه و به‌مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت تا تمامی حلال باقی‌مانده در آن به‌طور کامل حذف شود.

۲-۲-۲ استخراج چوبک به‌روش خیساندن

دونمونه از پودر چوبک به‌نسبت ۱۰٪ وزنی-حجمی^۱ (۱۰ گرم پودر گیاه در ۱۰۰ میلی‌لیتر حلال) در آب دوبار تقطیر حل شد و به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفت تا عملیات استخراج اولیه تکمیل شود. پس از طی شدن فرایند استخراج، برای نمونه شماره ۱، پودر گیاه فیلتر شد و عصارهٔ حاصل تا زمان انجام آنالیزهای مربوطه در یخچال نگهداری شد.

۲-۲-۳ استخراج چوبک به‌روش آب مادون بحرانی

نمونهٔ شماره ۲ یا همان نمونهٔ استخراج‌شده به‌روش آب مادون بحرانی، پس از طی شدن فرایند استخراج اولیه به‌روش خیساندن، به‌مدت ۱۲۰ دقیقه در داخل اتوکلاو قرار گرفت. دمای خارجی اعمال‌شده به اتوکلاو در این مدت زمان، براساس شرایط عملیاتی پژوهش هونگ^۲ و همکارانش ۱۳۰ درجهٔ سلسیوس در نظر گرفته شد [۲۱]. پودر گیاه فیلتر شد و عصارهٔ حاصل، به‌منظور انجام آنالیزهای مربوطه در یخچال نگهداری شد.

۲-۳ آنالیز و بررسی خواص

۲-۳-۱ آنالیز کف‌کنندگی^۳

به‌منظور بررسی میزان ساپونین استخراج‌شده، آنالیز کف‌کنندگی، مطابق با روش کیهانی و همکاران انجام شد [۲۲]. برای این کار،

1. 10% w/v
 2. Hong
 3. Foaming Test

حرارت‌دهی اعمال‌شده به آن، به درک اساسی از فرایند کمک می‌کند و باعث کنترل بهتر شرایط استخراج و در نتیجه افزایش بهره‌وری می‌شود [۱۷]. مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند یکی از به‌روزترین و کاربردی‌ترین روش‌های مهندسی است. در واقع شبیه‌سازی یک فرایند، نمایش ساده‌ای از یک سامانهٔ پیچیده است و با کمک آن می‌توان فعل و انفعالات یک سامانه را به‌راحتی بررسی کرد [۱۸].

این مهم به‌صورت تجربی یا امکان‌پذیر نیست و یا مستلزم صرف هزینهٔ بسیار زیادی است. از طرفی، در سامانه‌های مهندسی، گاهی نیاز به مقایسه و تحلیل چندین مدل مختلف است و انتخاب بهترین مدل ممکن است از نظر عملی تقریباً غیرقابل اجرا و یا هزینه‌بر باشد. اما با شبیه‌سازی و مدل‌سازی فرایند، با صرف کمترین هزینه و زمان می‌توان به بهترین نتیجهٔ ممکن رسید [۱۹]. از همین روی، مدل‌سازی ریاضی، گامی غیر قابل اجتناب در بهینه‌سازی مشخصه‌های عملیاتی، از جمله دما، برای صرفه‌جویی در هزینه و زمان است. این مدل‌سازی، می‌تواند در تبدیل فرایندهای متنوع مهندسی، از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی بسیار مؤثر واقع شود [۲۰].

در پژوهش پیش رو، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز، به شبیه‌سازی شرایط عملیاتی حرارتی آب داخل اتوکلاو با اعمال شرایط دمایی مختلف خارج از آن برای بررسی و تخمین حداقل زمان مورد نیاز برای دستیابی به آب در شرایط مادون بحرانی خود و محاسبهٔ دمای داخل اتوکلاو پرداخته شده است. همچنین فرایند استخراج ساپونین از چوبک با روش خیساندن در آب در دمای اتاق و در شرایط آب مادون بحرانی، بررسی و خواص محصول نهایی شامل شاخص کف‌کنندگی و قدرت امولسیون‌کنندگی ارزیابی شده است.

۲. مواد، روش‌ها

۲-۱ مواد

در این پژوهش ریشهٔ چوبک به‌عنوان منبع غنی از ساپونین از بازار محلی تبریز خریداری شد و به‌صورت پودر درآمد و تا زمان استفاده در ظرف دربسته نگهداری شد. حلال پترولیوم اتر به‌منظور چربی‌زدایی از پودر چوبک از شرکت مجللی خریداری شد. آب دوبار تقطیر، به‌عنوان حلال در استخراج ساپونین استفاده شد.

کاملی از روابط و معادلات دیفرانسیلی معمولی و جزئی را پوشش می‌دهد، به حل مسأله انتقال حرارت به صورت عددی و با استفاده از روش المان محدود در چندگام مختلف شامل تئوری و فرضیه‌های مسأله، فیزیک مسأله (اعم از هندسه و ناحیه موردنظر در مطالعه)، روابط و معادلات حاکم بر مسأله و روش حل آن، تعیین شرایط مرزی و گره‌بندی و شبیه‌سازی نهایی فرایند پایان می‌بخشد.

۲-۴-۱ کلیات، تئوری و فرضیه‌های مسأله

کلیات مسأله حاضر بررسی و شبیه‌سازی پدیده انتقال حرارت و کسب کمینه زمانی برای فراهم کردن شرایط آب مادون بحرانی در استخراج ساپونین از چوبک است؛ به طوری که برای حل مسأله حاضر از معادلات دیفرانسیل جزئی انتقال حرارت در حالت ناپایا با دو سازوکار انتقال حرارت رسانش و جابه‌جایی استفاده شد.

۲-۴-۲ فیزیک مسأله

فیزیک مسأله و شکل هندسی کلی آن یک اتوکلاو هیدروترومال مطابق شکل (۱-۱) است که شامل دو محفظه استوانه‌ای شکل هم‌مرکز از جنس استیل ضدزنگ و تفلون (پلی‌اتیلن ترفتالات) است که مواد در محفظه داخلی (تفلون) قرار می‌گیرد. طرحواره کلی اتوکلاو هیدروترومال در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.

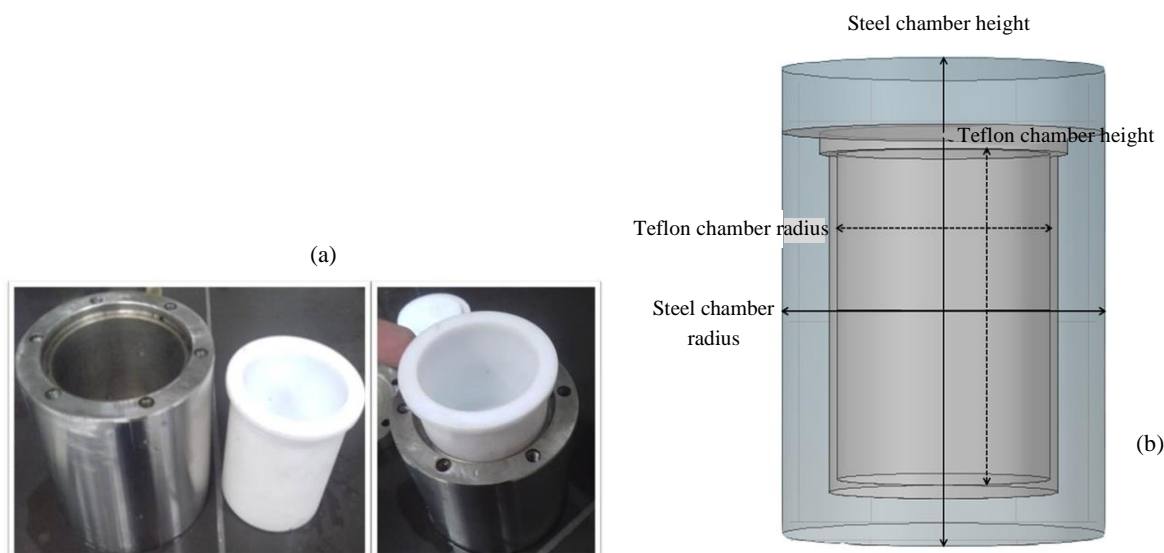
۵ میلی‌لیتر از نمونه‌ها در لوله آزمایش ریخته شد. سپس هر کدام از نمونه‌ها به مدت ۲ دقیقه تکان داده شد. سپس به مدت ۱ دقیقه، نمونه‌ها در حالت سکون قرار گرفتند. دوباره به مدت ۲۰ ثانیه نمونه‌ها تکان داده شد و در نهایت پس از ۱ دقیقه، ارتفاع کف ایجاد شده اندازه‌گیری شد.

۲-۳-۲ آنالیز قدرت امولسیون‌کنندگی^۱

برای بررسی خاصیت قدرت امولسیون‌کنندگی ساپونین استخراج شده، این آنالیز مطابق با روش کیهانی و همکاران انجام گرفت [۲۲]. برای انجام این آزمون، ۵ میلی‌لیتر از هر نمونه با ۵ میلی‌لیتر روغن آفتابگردان خوراکی مخلوط شد و به مدت ۳ دقیقه تکان داده شد. سپس ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفت و در آخر ارتفاع لایه امولسیون که بین لایه روغنی و لایه آبی حاوی ساپونین قرار گرفته بود، اندازه گرفته شد. با تقسیم ارتفاع این لایه به ارتفاع کل نمونه، قدرت امولسیون‌کنندگی حساب شد.

۲-۴-۳ شبیه‌سازی

استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز کمک شایانی به بررسی شرایط عملیاتی فرایندهای مختلف خواهد کرد. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) که مجموعه



شکل ۱. (a) اتوکلاو هیدروترومال (شامل دو محفظه استوانه‌ای) (b) طرحواره کلی

Figure 1. (a) Hydrothermal Autoclave (including two cylindrical chambers) (b) Overall schematic.

۲-۴-۳ روابط و معادلات حاکم بر مسأله و روش حل آن

یکی از گام‌های اصلی در شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی، انتخاب سامانه مختصاتی و تعیین روابط و معادلات حاکم بر مسأله و بیان ریاضی پدیده فیزیکی است. در مسأله حاضر، باتوجه به فیزیک مسأله، سامانه مختصاتی استوانه‌ای در نظر گرفته شد. هدف کلی، به دست آوردن دمای مواد موجود در محفظه داخلی است و برای نیل بدان، دو سازوکار انتقال حرارت رسانش و جابه‌جایی در نظر گرفته شد. باتوجه به این که در بخش آزمایشگاهی امکان اعمال شرایط مختلف دمایی وجود دارد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر به حداقل زمان رسیدن به شرایط مادون بحرانی می‌انجامد. معادله کلی انتقال حرارت ناپایا در رابطه (۱) که شامل چند بخش مختلف، شامل انتقال حرارت جابه‌جایی، رسانش و تولید حرارت است، آمده است.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

که در این رابطه، ρ معادل چگالی برحسب (کیلوگرم بر متر مکعب)، c_p ظرفیت گرمایی ویژه برحسب (ژول بر کیلوگرم کلوین)، k ضریب هدایت گرمایی برحسب (وات بر متر کلوین) و Q مقدار گرمای تولید شده است. اگر گردایان دمایی بخش هدایت به صورت گسترده بیان شود، معادله کلی انتقال حرارت به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(kr \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (2)$$

باتوجه به این که معادله حاضر پیچیدگی‌های بسیاری دارد و همچنین وجود برخی از بخش‌ها به دلیل اهمیت کمتر و سهم کم‌رنگ‌تر می‌تواند از معادله کلی حذف شود؛ لذا برای ساده‌سازی هرچه بیشتر شبیه‌سازی انجام گرفته، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- در سامانه شبیه‌سازی مورد نظر هیچ‌گونه تولید حرارتی وجود ندارد و لذا با حذف آن می‌توان از آن صرف نظر کرد.

- پدیده انتقال حرارت رسانشی در تمامی جهات مختصات استوانه‌ای رخ می‌دهد؛ اما در بعد شعاع (r) و بعد زاویه‌ای (ϕ)

کمترین تغییر دما رخ می‌دهد و بیشترین تغییرات دما در جهت ارتفاع (z) به وقوع می‌پیوندد، از همین رو، از دو بعد با کمترین میزان تغییرات دما می‌توان صرف نظر و معادله کلی انتقال حرارت را ساده‌تر کرد.

- سیال داخل محفظه‌های تفلون و استیل هیچ‌گونه حرکتی ندارد و ساکن است.

- در برخی از اجسام (معمولاً بی‌شکل) ضریب انتقال حرارت رسانش وابسته به جهت‌های مختلف مختصاتی است و دست‌خوش تغییرات می‌شود؛ اما در شبیه‌سازی پژوهش حاضر ضریب انتقال حرارت رسانش مستقل از بعدهای مختصاتی است و مقدار ثابتی دارد.

با فرضیات بیان‌شده معادله کلی انتقال حرارت ناپایا ساده‌تر و به صورت زیر (رابطه (۳)) تبدیل می‌شود.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

باتوجه به طرحواره کلی فرایند، دمای داخلی آون (دمای خارجی اتوکلاو هیدروترومال) به صورت متغیر از ۱۲۰ الی ۲۰۰ درجه سلسیوس است و به صورت انتقال حرارت جاب‌جایی، گرما از محیط داخلی آون به سطح اتوکلاو هیدروترومال منتقل می‌شود و سپس با پدیده انتقال حرارت رسانش، از سطح اتوکلاو (محفظه استوانه‌ای استیل ضدزنگ) ابتدا به بخش محفظه تفلون و در نهایت به آب درون آن انتقال پیدا خواهد کرد.

باتوجه به قوانین کلی پدیده‌های انتقال و تأثیر مقاومت‌ها بر کاهش اثرات تکانه (مومنتوم)، حرارت و جرم در مسأله حاضر پس از اعمال شرایط دمایی خارجی (دمای تنظیم‌شده آون) افت دما در مسیر انتقال حرارت رخ خواهد داد؛ به طوری که از آون به سطح اتوکلاو و از سطح اتوکلاو به مواد موجود در محفظه داخلی باتوجه به متفاوت بودن جنس‌های مواد به کاررفته (استیل ضدزنگ و تفلون) و متفاوت بودن ضرایب رسانش (k) آن‌ها، مقاومت‌های متنوعی وجود دارد و حرارت دریافت‌شده به وسیله آب موجود در محفظه داخلی به نظر می‌رسد کمتر از حرارت و دمای تنظیم‌شده باشد که با شبیه‌سازی مسأله حاضر در شرایط دمایی مختلف اعمال شده می‌توان به این مهم دست یافت.

۲-۴-۴ تعیین شرایط مرزی، شرایط اولیه و گره‌بندی

طبق توضیحات بخش‌های پیشین، برای شبیه‌سازی مسأله حاضر حل معادله بیان‌شده رابطه (۳) که پدیده انتقال حرارت ناپایا است به صورت عددی انجام می‌شود. مقادیر ثابت‌های مختلف محفظه‌های استیل ضدزنگ و ظرف پلیمری تفلون از جمله (چگالی (ρ) ظرفیت گرمای ویژه (C_p) و ضریب انتقال گرمای هدایت (k) و ثابت نسبت پواسون) در جدول (۱) بیان شده‌است.

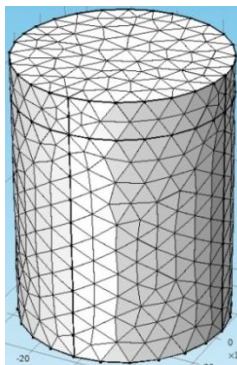
جدول ۱. ضرایب و ثوابت لازم برای حل و مدل سامانه.

Table 1. Coefficients and constants to solve and model the system.

	Teflon Chamber	Steel Chamber
Density (kg/m^3)	2200	7800
Specific heat capacity (J/Kg.K)	1003	500
Conduction heat transfer coefficient (W/m.K)	2.15	15
Poisson's ratio	0.46	-

در حل معادلات دیفرانسیل جزئی، بسته به تعداد متغیرها و نوع آن‌ها نیاز به تعیین شرایط مرزی و اولیه است؛ در مسأله حاضر معادله انتقال حرارت نهایی به دست آمده شامل ۲ متغیر مستقل زمان و مکان است. شرط مرزی برای حل مسأله و شبیه‌سازی پژوهش حاضر- همان‌طور که بیان شده- به‌طور متغیر و در ۵ حالت مختلف ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس (دمای آن که اتوکلاو در معرض آن است) در نظر گرفته شده و دمای اولیه کل سطوح اتوکلاو شامل (محفظه استیل ضدزنگ، محفظه تفلون و آب داخل تفلون) ۲۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. هم‌چنین برای شبیه‌سازی دقیق‌تر مسأله به مقدار عددی ضریب انتقال حرارت هم‌رفتی نیاز است که مقدار $20 \text{ W/m}^2.\text{K}$ برای آن در نظر گرفته شد. در نهایت، باتوجه به حل عددی شبیه‌سازی حاضر براساس معادلات حاکم بر مدل و شروط مرزی و اولیه مناسب در نظر گرفته شده، نیاز به شبکه‌بندی فیزیک مسأله است که در آن از روش المان محدود (FEM) برای حل عددی معادلات حاکم استفاده شده‌است. به همین سبب کل سامانه به بخش‌های کوچک (که هرکدام یک گره، یک

المان معادل با یک معادله محسوب می‌شوند) تقسیم‌بندی شده که شکل مثلی برای گره‌بندی استفاده شد (شکل (۲)).



شکل ۲. گره‌بندی کلی مسأله.

Figure 2. General meshing.

۳. نتایج و بحث

۳-۱ شبیه‌سازی فرایند

برحسب توضیحات کامل بیان شده در بخش‌های پیشین، در رابطه با نحوه شبیه‌سازی، شرایط مرزی و اولیه و گره‌بندی انجام گرفته، به‌منظور به‌دست آوردن حداقل زمان رسیدن به شرایط مادون بحرانی مواد درون اتوکلاو هیدروترمال معادلات ریاضی بیان شده با فرضیات لازم حل شد. پس از اجرای نرم‌افزار و حل آن، منحنی‌های تغییرات دما به دست آمده که در ۵ سطح دمایی خارجی (دمای تنظیم‌شده آون) ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس شبیه‌سازی انجام گرفت و نتایج مختلف مطابق با شرایط اعمال شده به دست آمد. برای سهولت مقایسه داده‌های به دست آمده حاصل از شبیه‌سازی فرایند، نتایج در جدول (۲) گزارش شده‌است.

باتوجه به نتایج به دست آمده از جدول (۲)، حداقل زمان رسیدن به شرایط مادون بحرانی برای اتوکلاو هیدروترمال به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که به‌طور مثال با اعمال دمایی خارجی (دمای تنظیم‌شده آون) ۲۰۰ درجه سلسیوس، حداقل زمان رسیدن به شرایط مادون بحرانی ۵۰ دقیقه است؛ به عبارتی یعنی در زمان‌های کمتر از ۵۰ دقیقه، مواد داخل اتوکلاو و محفظه تفلونی هنوز شرایط مادون بحرانی را تجربه نکرده و استخراج به درستی انجام نخواهد گرفت. به همین دلیل اهمیت کمینه دمایی مورد نیاز برای استخراج، براساس دمایی اعمال شده حائز اهمیت است و بدین گونه

که رابطه حاضر، t_{min} حداقل زمان مورد نیاز و T دمای خارجی اعمال شده است. براساس این رابطه برای شرایط دمایی خارجی اعمال شده به صورت آزمایشگاهی در پژوهش حاضر (۱۳۰ درجه سلسیوس) زمان مورد نیاز حداقل ۸۷ دقیقه بوده تا شرایط مادون بحرانی در داخل اتوکلاو اعمال شود. پس در شرایط اعمال شده برای استخراج به روش آب مادون بحرانی، یعنی دمای خارجی ۱۳۰ درجه سلسیوس و مدت زمان ۱۲۰ دقیقه، آب کاملاً در حالت مادون بحرانی خود قرار دارد.

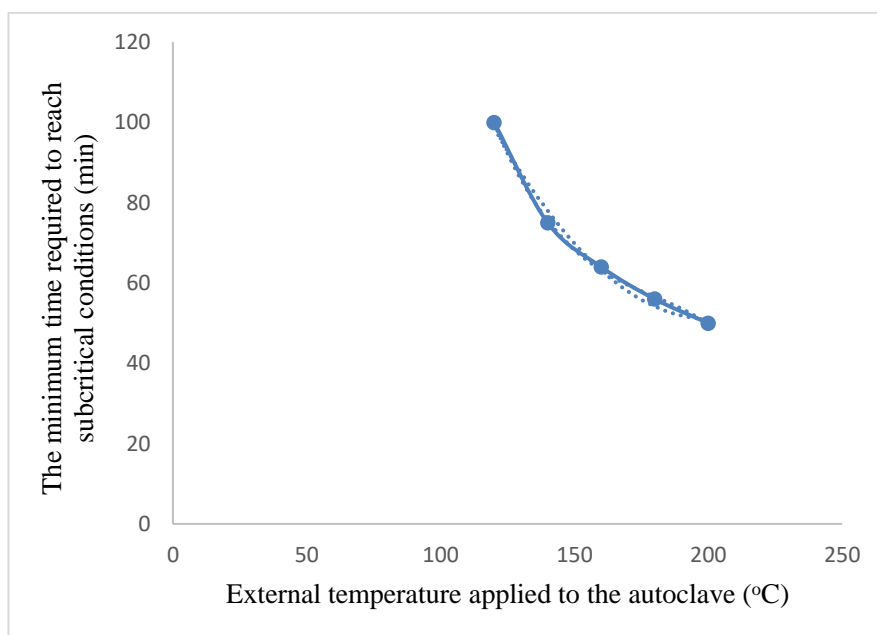
مدت زمان انتظار برای اغنای شرایط مادون بحرانی به دست می آید و استخراج با بازدهی بالاتری انجام خواهد گرفت. هم‌چنین منحنی عبوری از داده‌های جدول (۲)، مطابق شکل (۳) رسم شد. در نهایت، رابطه (۴) که حداقل زمان مورد نیاز را برای رسیدن شرایط داخل اتوکلاو به شرایط مادون بحرانی برحسب دمای خارجی اعمال شده نشان می‌دهد که از درجه دوم پیروی کرد و با اطمینان بالا ($R^2=0.99$) به دست آمد.

$$t_{min} = 0.0073T^2 - 2.973T + 345.77 \quad (4)$$

جدول ۲. حداقل زمان مورد نیاز برای رسیدن به شرایط داخل اتوکلاو به شرایط مادون بحرانی برحسب دمای خارجی اعمال شده.

Table 2. The minimum required time to achieve subcritical conditions inside the autoclave based on applied external temperature.

External temperature (°C)	The minimum required time to achieve subcritical conditions (min)
120	100
140	75
160	64
180	56
200	50



شکل ۳. کردار حداقل زمان مورد نیاز برای رسیدن شرایط داخل اتوکلاو به شرایط مادون بحرانی برحسب دمای خارجی اعمال شده.

Figure 3. Minimum required time to achieve subcritical conditions inside the autoclave based on applied external temperature.

برحسب دمای خارجی اعمال شده نشان می‌دهد. این رابطه از درجه اول پیروی کرد و با اطمینان بالا ($R^2=0.999$) به دست آمد.

$$T_{in} = 0.895T - 0.4 \quad (5)$$

در این رابطه T_{in} دمای آب داخل اتوکلاو در شرایط مادون بحرانی خود و T دمای خارجی اعمال شده است. براساس رابطه (۵)، در صورتی که اتوکلاو در معرض دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۲۰ دقیقه قرار گیرد، دمای آب مادون بحرانی داخل آن به ۱۱۶ درجه سلسیوس خواهد رسید.

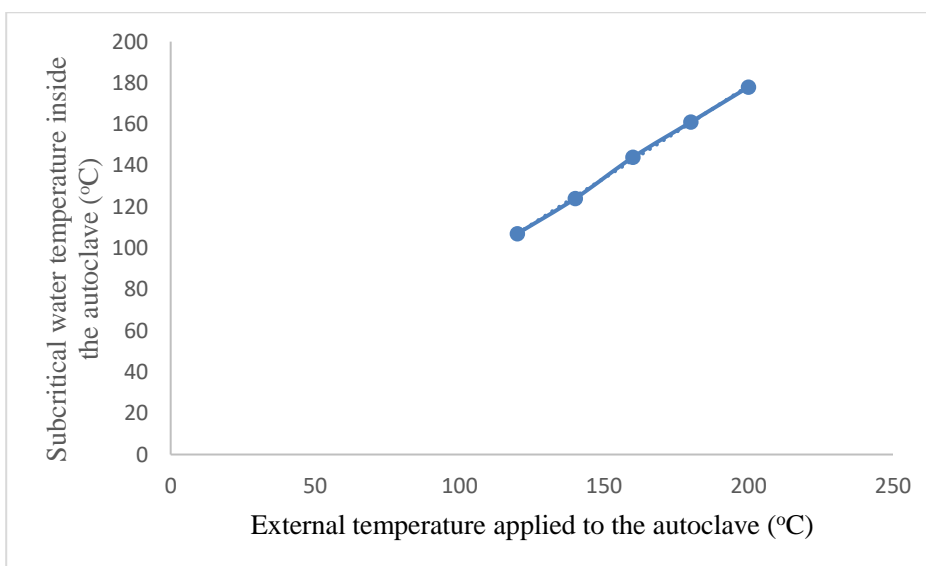
در مرحله بعدی شبیه سازی، با ثابت دنظر گرفتن زمان ۱۲۰ دقیقه نتایج حاصل از شبیه سازی فرایند برای ۵ سطح از دمای خارجی اعمال شده (دمای تنظیم شده آن)، یعنی ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه، دمای داخل اتوکلاو برای هر کدام از این سطوح حساب شد که نتایج آن در جدول (۳) گزارش شده است.

باتوجه به نتایج جدول (۳)، دمای آب داخل اتوکلاو در شرایط مادون بحرانی در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه با اعمال دمای خارجی ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس، به ترتیب ۱۰۷، ۱۲۴، ۱۴۴، ۱۶۱ و ۱۷۸ درجه سلسیوس بود. شکل (۴) منحنی عبوری از داده های جدول (۳) را نشان می‌دهد. رابطه (۵) دمای آب داخل اتوکلاو را در شرایط مادون بحرانی

جدول ۳. دمای آب مادون بحرانی داخل اتوکلاو در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه برحسب دمای خارجی اعمال شده.

Table 3. Inside temperature of Subcritical water after 120 minutes based on applied external temperature.

External temperature (°C)	Subcritical water temperature inside the autoclave (°C)
120	107
140	124
160	144
180	161
200	178



شکل ۴. کردار دمای آب مادون بحرانی داخل اتوکلاو در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه برحسب دمای خارجی اعمال شده.

Figure 4. Inside temperature of Subcritical water after 120 minutes based on applied external temperature.

بیشتری خواهد داشت؛ همان‌طور که آزمون قدرت کف‌کنندگی نیز در ادامه این نتیجه‌گیری را تأیید می‌کند.



شکل ۶. نمونه‌های ساپونین استخراج شده (نمونه ۱: روش خیساندن؛ نمونه ۲: روش آب مادون بحرانی).

Figure 5. Extracted saponin samples (Sample 1: Maceration method and sample 2: Subcritical water method).

هم‌چنین نتایج چربی‌زدایی با دستگاه سوکسله نشان داد که میزان چربی موجود در چوبک، ۳٪ بود. با توجه به چگالی زیاد چربی و در نتیجه جرم پایین این ماده، به نظر می‌رسد که این درصد، میزان زیادی از چربی را شامل شود؛ به همین دلیل، چربی‌زدایی به‌عنوان مرحله پیش‌تیمار می‌تواند در فرایند استخراج تأثیرگذار باشد.

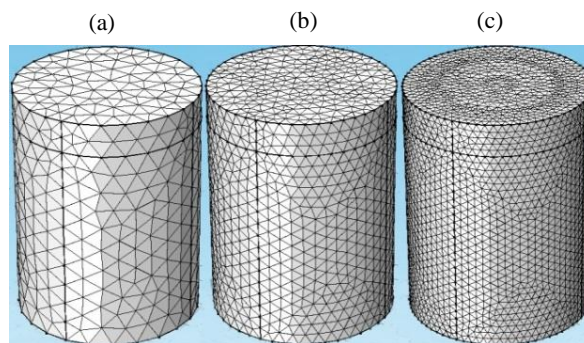
۳-۳-۱ آنالیز کف‌کنندگی محصول ساپونین

میزان ارتفاع کف اندازه‌گیری شده برای نمونه ۱ (خیسانده‌شده در آب) و نمونه ۲ (استخراج شده به روش آب مادون بحرانی) به ترتیب، ۱۵ و ۴۰ میلی‌متر بود. این افزایش ارتفاع، نشان از آن دارد که میزان ساپونین استخراج شده در روش آب مادون بحرانی بیش از ۲/۵ برابر افزایش یافته بود که میزان چشم‌گیری است. نیز محدث و همکارانش، ساپونین را از برگ درخت سدر با سه روش بن‌ماری، ماکروویو و آب مادون بحرانی انجام و نشان دادند که روش آب مادون بحرانی بیشترین بازده استخراج را از بین روش‌های دیگر داشت [۲۳]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش آب مادون بحرانی روشی مناسب برای استخراج ساپونین است. شکل (۷) نتایج آزمون قدرت کف‌کنندگی را برای دو نمونه نشان می‌دهد.

۲-۳ بررسی استقلال حل از تعداد المان و اعتبارسنجی نتایج

شبیه‌سازی

در بسیاری از شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته، دقت حل در نرم‌افزار انتخاب‌شده متأثر از تعداد و اندازه المان‌های ایجاد شده است؛ به طوری که هرچه تعداد گره‌ها بالاتر باشد، پاسخ مناسب‌تری به دست خواهد آمد. اما این افزایش تعداد گره‌ها منجر به افزایش زمان حل خواهد شد. با توجه به این که در تحقیق حاضر از نرم‌افزار برای شبکه‌بندی از گره مثلثی استفاده شد، برای بررسی استقلال حل از تعداد گره‌ها، دو شبکه‌بندی دیگر با اندازه‌های متفاوت و کوچک‌تر مطابق شکل (۵) تهیه شد و تفاوت نامحسوسی بین نتایج دیده نشد، از این رو برای صرفه‌جویی در زمان به دست آوردن نتایج شبیه‌سازی، بزرگ‌ترین شبکه‌بندی انتخاب شد.



شکل ۵. شبکه‌بندی با اندازه‌های مختلف (a)، کمترین تعداد گره (b)، بیشترین تعداد گره (c).

Figure 5. Networking with different sizes ((a), the lowest number of nodes, (c) the highest number of nodes).

پس از انجام آزمایش با استفاده از اتوکلاو مجهز به دماسنج و فشارسنج به صورت داده تجربی تحت شرایط اعمال دمای خارجی ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس، حداقل زمان رسیدن به شرایط مادون بحرانی به ترتیب، ۱۰۶، ۷۹، ۶۷، ۶۰ و ۵۳ دقیقه به دست آمد که با نتایج حاصل از شبیه‌سازی اختلاف معنی‌داری نداشت.

۳-۳ نتایج تجربی و آزمایشگاهی

شکل (۶)، محلول ساپونین استخراج شده را نشان می‌دهد. چنان که از شکل پیدا است، نمونه شماره ۲ رنگ تیره‌تری نسبت به نمونه شماره ۱ دارد و می‌توان پیش‌بینی کرد که نمونه ۲ میزان ساپونین



شکل ۷. آزمون قدرت کف‌کنندگی و ارتفاع کف ساپونین استخراج‌شده (نمونه ۱: روش خیساندن و نمونه ۲: روش آب مادون بحرانی).

Figure 6. Foaming ability test and foam height of the extracted saponin (Sample 1: Maceration method and sample 2: Subcritical water method).

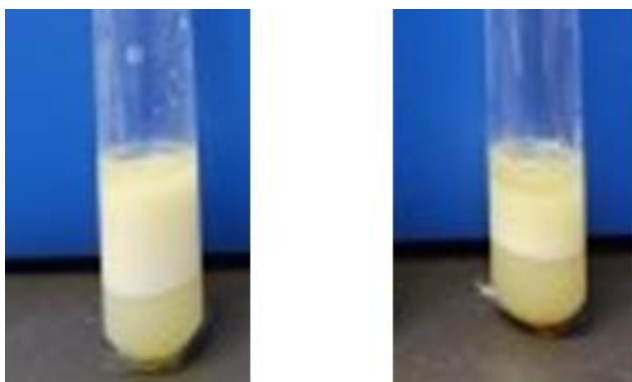
عملیاتی یعنی دما برای استخراج ساپونین باروش آب مادون بحرانی بررسی و نتیجه چنین شد که به‌کارگیری مدل‌های انتقال حرارت براساس قوانین بنیادی موازنه انرژی، توانایی مناسبی برای مدل کردن استخراج ترکیبات زیست‌فعال خواهد داشت. باتوجه‌به شبیه‌سازی انجام‌شده، محدوده دمایی و زمانی انتخاب‌شده برای استخراج به‌روش آب مادون بحرانی به‌طور کامل در محدوده شرایط مادون بحرانی برای آب قرار می‌گرفت. هم‌چنین دمای آب مادون بحرانی داخل اتوکلاو در شرایط عملیاتی استخراج به‌دست آمد. درنهایت استخراج ساپونین از چوبک به دو روش خیساندن در حلال آب و استخراج با آب مادون بحرانی انجام گرفت و نتایج تجربی نشان داد که آب مادون بحرانی توانایی مناسبی برای استخراج ساپونین نسبت‌به روش خیساندن دارد و می‌توان آن‌را به‌عنوان روشی مناسب در استخراج ترکیبات با ارزش از مواد، معرفی کرد.

۳-۲-۳ آنالیز قدرت امولسیون‌کنندگی محصول ساپونین

قدرت امولسیون‌کنندگی برای نمونه ۱ و ۲ به‌ترتیب، $38/5\%$ و $56/7\%$ به‌دست آمد. چنان‌که در شکل (۸) پیدا است، ساپونین استخراج‌شده به‌روش آب مادون بحرانی، قدرت امولسیون‌کنندگی بیشتری نسبت‌به روش خیساندن در حلال دارد و در نتیجه بازده استخراج ساپونین به‌روش آب مادون بحرانی نسبت‌به روش خیساندن افزایش یافته‌است. مطابق با نتایج کیهانی و همکارانش، با افزایش غلظت ساپونین قدرت امولسیون‌کنندگی افزایش می‌یابد [۱۸]. باتوجه‌به نتیجه آنالیز کف‌کنندگی که نشان می‌داد میزان ساپونین استخراج‌شده در نمونه ۲ بیشتر از نمونه ۱ بود، پس افزایش قدرت امولسیون‌کنندگی برای نمونه ۲ کاملاً توجیه‌پذیر است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش انجام‌شده، شبیه‌سازی یکی از اساسی‌ترین شرایط



شکل ۸. آزمون قدرت امولسیون‌کنندگی (نمونه ۱: روش خیساندن و نمونه ۲: روش آب مادون بحرانی).

Figure 7. Emulsification capacity test (Sample 1: Maceration method and sample 2: Subcritical water method).

- [8] Najjar-Tabrizi, R., Javadi, A., Sharifan, A., Chew, K. W., Lay, C. H., Show, P. L., & Berenjian, A. (2020). Hydrothermally extraction of saponin from *Acanthophyllum glandulosum* root-Physico-chemical characteristics and antibacterial activity evaluation. *Biotechnology Reports*, 27, e00507.
- [9] Aryan, S., Mortazavian, A. M., Mohammadi, F., Mahdavi, V., Moazami, N., & Jazaeri, S. (2021). Physicochemical properties of saponin containing *Acanthophyllum laxiusculum* extract: example application in foam stability and qualitative parameters for malt beverage industry. *Journal of Food Science and Technology*, 1-11.
- [10] Surin, S., You, S., Seesuriyachan, P., Muangrat, R., Wangtueai, S., Jambak, A. R., & Phimolsiripol, Y. (2020). Optimization of ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from purple glutinous rice bran (*Oryza sativa* L.) and their antioxidant activities. *Scientific Reports*, 10(1), 10410.
- [11] Suresh, P. S., Singh, P. P., Kapoor, S., Padwad, Y. S., & Sharma, U. (2022). Lactic acid-based deep eutectic solvent: An efficient green media for the selective extraction of steroidal saponins from *Trillium govanianum*. *Separation and Purification Technology*, 294, 121105.
- [12] Anvarinezhad, M., Jafarizadeh-Malmiri, H., Javadi, A., & Azadmard-Damirchi, S. (2021). Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Clove Extract by Three Different Heating Methods and Evaluation of their Properties. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 20(118), 78-87, In Persian.
- [13] Ahmadi, O., Seifi, M. J., & Jafarizadeh-Malmiri, H. (2021). Simulation of Silver Nanoparticles Green Synthesis Using Aloe Vera leaf Extract and Microwave Heating, and Evaluation of their Characteristics. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 20(114), 82-96, In Persian.
- [14] Essien, S. O., Young, B., & Baroutian, S. (2020). Recent advances in subcritical water and supercritical carbon dioxide extraction of bioactive compounds from plant materials. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 156-169.
- [15] Basak, S., & Annapure, U. S. (2022). The potential of subcritical water as a "green" method for the extraction and modification of pectin: A critical review. *Food Research International*, 111849.
- [16] Pu, Y., Wang, J. X., Wang, D., Foster, N. R., & Chen, J. F. (2019). Subcritical water processing for nanopharmaceuticals. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 140, 36-42.
- [17] Sartor, R. B., Secchi, A. R., Soares, R. D. P., & Cassel, E. (2011). Dynamic simulation of rosemary essential oil extraction in an industrial steam distillation unit. *Industrial & engineering chemistry research*, 50(7), 3955-3959.

۵. تقدیر و تشکر

از دانشگاه صنعتی سهند به سبب پشتیبانی مالی و در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی در اجرای این پروژه تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Dabestani, M., Yeganehzad, S., & Miller, R. A. (2021). Natural source of saponin: comprehensive study on interfacial properties of *Chubak* (*Acanthophyllum Glandulosum*) root extract and related saponins. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 630, 127594.
- [2] Yusoff, I. M., Taher, Z. M., Rahmat, Z., & Chua, L. S. (2022). A review of ultrasound-assisted extraction for plant bioactive compounds: Phenolics, flavonoids, thymols, saponins and proteins. *Food research international*, 157, 111268.
- [3] Moghimipour, E., Jasemnezhad, M., Mohammad Soleymani, S., & Salimi, A. (2021). Preparation and evaluation of a free surfactant herbal shampoo with *Acanthophyllum Squarrosom* Saponins. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 20(1), 181-187.
- [4] Das, D., Mohapatra, R. K., Parhi, P. K., Sarangi, A. K., Sahu, R., & Barik, S. R. (2020). Sustainable and efficient route for the regeneration of carbonyl compounds from oximes using aqueous extract of *sapindus laurifolia* under microwave radiation. *ACS omega*, 5(13), 7716-772.
- [5] Brindhadevi, K., Chidambaram, M., Kavitha, R., Govindaraj, R., Chinnathambi, A., Salmen, S. H., & Natesan, V. (2023). Extraction, antioxidant, and anticancer activity of saponins extracted from *Curcuma angustifolia*. *Applied Nanoscience*, 13(3), 2063-2071.
- [6] Randriamamonjy, T. H., Ontiveros, J. F., Andrianjafy, M. T., Samiez, P., Berlioz-Barbier, A., Nardello-Rataj, V., & Lemaire, M. (2022). Comparative study on the amphiphilicity, emulsifying and foaming properties of saponins extracted from *Furcraea foetida*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 653, 129923.
- [7] Razzaghi-Koolaei, F., Zargar, G., Soltani Soulgani, B., & Mehrabianfar, P. (2022). Application of a non-ionic bio-surfactant instead of chemical additives for prevention of the permeability impairment of a swelling sandstone oil reservoir. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(6), 1523-1539.

- [18] Turgay, M. B., & Yazıcıoğlu, A. G. (2018). Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a trapezoidal microchannel with COMSOL multiphysics: a case study. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 73(5), 332-346.
- [19] Ahmadi, O., & Jafarizadeh-Malmiri, H. (2021). Simulation of the Preparation of Thyme Essential Oil Nanoemulsion Process Using Sub-Critical Water and Evaluation of Its Properties. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 51(4), 705-714, In Persian.
- [20] Ahmadi, O., & Jafarizadeh-Malmiri, H. (2020). Mass Transfer Modeling in the Process of Thyme Essential Oil Extraction and Evaluation of Physico-Chemical Properties. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 19(109), 27-36, In Persian.
- [21] Wu, H., Li, C., Li, Z., Liu, R., Zhang, A., Xiao, Z., & Deng, S. (2018). Simultaneous extraction of oil and tea saponin from *Camellia oleifera* Abel. seeds under subcritical water conditions. *Fuel Processing Technology*, 174, 88-94.
- [22] Keyhani, V., Mortazavi, S. A., Karimi, M., Karazhiyan, H., & Sheikholeslami, Z. (2016). Ultrasound-assisted extraction of saponins from chubak plant (*Acanthophyllum Glandulosum*) root based on their emulsification and foaming properties. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 4(4), 325-342, In Persian.
- [23] Mohaddes-Kamrانشahi, M., Jafarizadeh-Malmiri, H., Simjoo, M., & Jafarizad, A. (2019). Evaluation of the saponin green extraction from *Ziziphus spinachristi* leaves using hydrothermal, microwave and Bain-Marie water bath heating methods. *Green Processing and Synthesis*, 8(1), 62-67.